

限水灌溉下施氮量对冬小麦产量、氮素利用及氮平衡的影响

宁东峰¹, 李志杰^{2*}, 孙文彦², 马卫萍², 黄绍文¹, 赵秉强^{1,2}

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划所, 北京 100081; 2 中国农业科学院德州实验站, 山东德州 253015)

摘要: 2008 ~ 2009 年通过大田试验, 研究了限水灌溉条件下, 不同施氮量对冬小麦产量、氮素利用、土壤硝态氮动态变化及氮素平衡的影响。结果表明, 施用氮肥显著增加小麦穗数和穗粒数, 对千粒重无显著影响。作物产量、吸氮量与施氮量均呈抛物线关系, 施氮量超过 N 240 kg/hm², 产量和吸氮量随施氮量增加略有降低。小麦起身期后, 0—100 cm 土层都有硝态氮分布, 且随土层深度增加而减少; 相同土层则随施氮量的增加而增加。土壤硝态氮积累量随生育期推进而降低, N₀ 和 N₁₂₀ 处理分别在拔节期和开花期后表现出氮素亏缺; 成熟期, 土壤表观盈余以残留为主, 表观损失量占小部分。氮肥表观利用率、农学利用率随施氮量增加呈降低趋势, 而氮素残留率随施氮量增加呈增加趋势。在本试验条件下, 施氮量在 N 180 ~ 220 kg/hm² 水平可以达到产量、氮素表观利用率、氮素残留率的较好结合, 是限水灌溉下兼顾经济效益与环境效益的适宜施氮量。

关键词: 限水灌溉; 冬小麦; 产量; 氮素利用; 氮平衡

中图分类号: S512.1⁺1.071

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2010)06-1312-07

Effects of nitrogen application on grain yield, nitrogen utilization and balance of winter wheat under limited irrigation condition

NING Dong-feng¹, LI Zhi-jie^{2*}, SUN Wen-yan², MA Wei-ping², HUANG Shao-wen¹, ZHAO Bing-qiang^{1,2}

(1 Agricultural Resources and Regional Planning Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2 Dezhou Experiment Station, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Dezhou, Shandong 253015, China)

Abstract: Effects of different N application rates on grain yield and N utilization of winter wheat and soil N balance were studied using field experiment under water-limited irrigation during 2008–2009. The results show that spike numbers and per spike grains of winter wheat are significantly increased under N applications, while the 1000-grain weight is not significant increased. The relationships between grain yield, N uptake and the N application rates are parabolic, and grain yield and N uptake are reduced when N application rates exceed N 240 kg/ha. Soil NO₃⁻-N is found at 0–20, 20–40, 40–60, 60–80 and 80–100 cm soil layers after the erecting stage of winter wheat. Soil NO₃⁻-N contents are decreased with increase of soil layer depth under the same treatment, and are increased with increase of N application rates at the same layer. Soil NO₃⁻-N accumulations decrease with winter wheat growth and development. Under the N₀ and N₁₂₀ treatments, there are NO₃⁻-N deficiencies after the jointing stage and anthesis stage. In the harvest stage, soil residual N in 100 cm soil layer is the main part of surplus N, and soil lost N accounts for little percentage. With increase of N application rates, N utilization efficiency and N agronomy efficiency appear downtrend, while the N residual efficiency appears uptrend. Under this experiment condition, N application rates from N 180 to 220 kg/ha has good combinations of grain yield, N utilization efficiency and N residual efficiency. Therefore, the N 180–220 kg/ha are ideal N rates considering both economic benefit and environmental benefit

收稿日期: 2010-01-04

接受日期: 2010-02-21

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项; 国家重点基础研究发展计划(973 计划)“肥料减施增效与农田可持续利用基础研究”(2007CB109306)项目资助。

作者简介: 宁东峰(1985—), 女, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事作物水肥高效利用机制研究。

Tel: 0534-2186501, E-mail: smile_0808@163.com.

* 通讯作者 Tel: 0534-2186307, E-mail: lizhijie5612@163.com

under water-limited irrigation.

Key words: limited irrigation; winter wheat; grain yield; N utilization; N balance

施用氮肥是作物获得高产的重要措施,但施用不当也会给农业生态系统带来危害。农田氮肥过量施用引起的土壤、水体、大气污染等环境问题已引起广泛关注^[1-9]。近年来,我国氮肥用量持续增加,但作物产量并未随之增加,氮肥当季利用率只有 30%~35%^[3-5]。施肥和灌水是影响土壤氮素利用和淋洗的两大因子。大量研究表明,施氮量与作物产量呈抛物线关系,随施氮量增加氮素利用率降低,土壤剖面硝态氮残留量增加^[2-11]。灌水量或降雨量越多,硝态氮随土壤水分向下淋洗损失也越多^[2-9, 12-13]。关于水肥耦合,节水省肥,同步增加水肥利用效率的研究也有很多报道^[14-17]。冬小麦是黄淮海地区主要粮食作物,生长季水分短缺是生产中最大的障碍因子,发展冬小麦节水高产高效栽培势在必行。为此,在前人研究的基础上,进一步探讨在限水灌溉条件下氮肥用量与冬小麦产量、氮肥利用及氮平衡的关系,以期找出该地区经济效益与环境效益统一的适宜施氮量,为该地区冬小麦节水高产高效栽培提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2008~2009 年在山东省陵县中国农业科学院德州实验站陵县试验基地进行。该基地位于鲁西北黄河下游平原,年平均降水量 550 mm,多集中在 6~8 月份。土壤为盐化潮土,质地轻壤。耕层有机质含量 12.4 g/kg,全氮 0.74 g/kg,无机态氮 10.4 mg/kg,有效磷 9.9 mg/kg,有效钾 80.6 mg/kg, pH 值为 8.3。播前试验地 1 m 土体土壤容重和田间持水量见表 1。小麦生育期内总降水量 157.3 mm (播种至越冬期 14.9 mm,越冬至起身期 18.2 mm,起身至拔节期 8.9 mm,拔节至开花期 39.1 mm,开花至成熟期 76.2 mm)。

试验设 5 个氮肥处理,即:施 N 0、120、180、240、300 kg/hm²,分别以 N₀、N₁₂₀、N₁₈₀、N₂₄₀、N₃₀₀ 表示,3 次重复,小区面积 5 m × 8 m,随机区组排列。各处理结合耕翻整地,基施 P₂O₅ 150 kg/hm²,K₂O 150 kg/hm² 和 N 60%,剩余 40% N 于拔节期结合浇水追施。所用氮肥为尿素(含 N 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 14.2%),钾肥为硫酸钾(含 K₂O 50%)。供试小麦为节水型品种石麦 15,播种量 225

表 1 1 m 土体土壤容重和田间持水量

Table 1 Soil bulk and field moisture capacity of 1 m soil layer

土层(cm) Soil layer	容重(g/cm ³) Soil bulk	田间持水量(%) Field moisture capacity
0—20	1.35	20.1
20—40	1.36	20.9
40—60	1.35	20.8
60—80	1.35	21.0
80—100	1.34	21.2

kg/hm²,播种行距 17 cm,采用限水灌溉模式,即播前浇足底墒水,拔节期(4 月 13 日)灌水 1 次,灌溉量为 60 mm(常规灌溉为拔节水 + 开花水 + 灌浆水)。三叶期定苗,基本苗 3.43 × 10⁶ 株/hm²。

1.2 测定项目与方法

土壤无机氮动态测定:在小麦返青期、拔节期、开花期、成熟期分别取 0—100 cm 土层(每 20 cm 为一层)土样,每小区取 2 点合并。土样一部分用烘干称重法测定含水量,另一部分用 0.01 mol/L CaCl₂ 浸提,水土比为 5:1,180 r/min 振荡 30 min,过滤后装于干净的塑料瓶中,冷冻保存,小麦收获后统一用流动分析仪测定硝态氮、铵态氮含量。

植株不同器官氮含量测定:小麦成熟期,每小区选择有代表性的 0.5 m 双行小麦,紧贴根部收割。将收回小麦按叶片、茎秆 + 叶鞘、护颖 + 穗轴、子粒 4 部分分开。样品于 75℃ 烘箱中烘至恒重,记录各器官干重。样品粉碎后用半微量凯氏定氮法测定各器官全氮含量。

产量测定:小麦成熟时,每小区取均匀 0.5 m 双行小麦进行常规考种;每小区选代表性样方(4 m²)测产。

有关参数计算方法^[18-19]:

作物吸氮量(kg/hm²) = 地上部生物量 × 植株地上部氮浓度;

氮素收获指数(%) = 子粒吸氮量/植株吸氮量 × 100;

氮素表观利用率(%) = (施氮区吸氮量 - 未施氮区吸氮量)/施氮量 × 100;

氮素农学利用率 ($\text{kg}_{\text{Grain}}/\text{kg}_N$) = (施氮区作物产量 - 未施氮区作物产量)/施氮量;

土壤无机态氮积累量 (kg/hm^2) = 土层厚度 × 土壤容重 × 土壤无机态氮含量/10;

生育期土壤氮素净矿化量 (kg/hm^2) = 未施氮区作物吸氮 + 未施氮区土壤残留无机态氮 - 未施氮区土壤起始无机氮积累量;

氮表观损失 (kg/hm^2) = (起始无机氮积累量 + 施氮量 + 有机氮净矿化量) - (作物吸氮量 + 土壤残留无机态氮量);

氮素表观盈余 (kg/hm^2) = 氮素表观残留量 + 氮素表观损失量;

氮素表观残留率 (%) = (施氮区无机氮残留量 - 未施氮去无机氮残留量)/施氮量 × 100。

试验数据用 Microsoft Excel 和 SAS 软件进行分析,采用 LSD 法进行差异显著性比较。

2 结果分析

2.1 冬小麦生育期土壤含水量动态变化

由于播种前浇足底墒水,播前土壤水分充足,不同施氮处理小麦各生育期土壤含水量相似。图 1 看出,小麦拔节期前,根系较浅,以消耗 0—40 cm 土层水分为主,播种至拔节期降水 42.2 mm,并浇足底墒水,天气虽相对干旱,但 0—40 cm 土层含水量仍可维持在 15%~20% 左右;拔节期植株生长旺盛,耗水剧烈,0—40 cm 土层土壤含水量显著降低,出现轻度水分亏缺;但此期灌水 60mm,拔节至开花期间降水 39.1 mm,土壤水分得到补充,40—100 cm 水分充足。开花期 0—20 cm 土层水分较拔节期略微降低,达轻度水分亏缺;开花至成熟期降水 76.2 mm,20—100 cm 含水量增加,水分充足。成熟期 0—20cm 土层水分较开花期降低,达中度水分亏缺;随着小麦根系深扎及表土层干旱胁迫,20—60 cm 土层土壤含水量显著降低,60—100 cm 土层含水量下降不显著。

2.2 不同施氮量对冬小麦产量及吸氮量的影响

2.2.1 对冬小麦产量及其构成因素的影响 小麦单位面积穗数随施氮量增加而增加,当施氮超过 N_{180} kg/hm^2 时增产不显著;不施氮处理穗粒数显著低于其它处理,其它处理间差异不显著;所有处理间千粒重均无显著差异(表 2)。相关分析表明,施氮量与小麦产量呈抛物线关系:

$$y_{CY} = -0.0011x^2 + 0.6423x + 103.33, R^2 = 0.9547$$

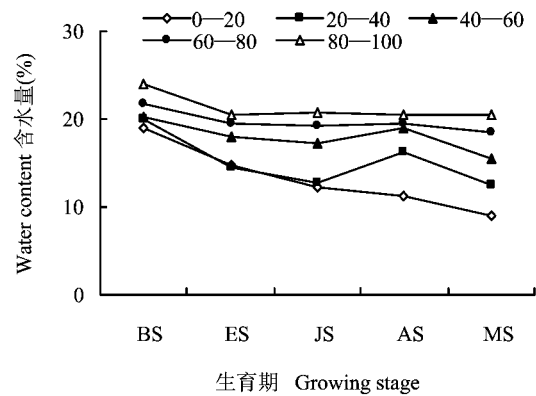


图 1 冬小麦不同生育时期土壤含水量变化动态
Fig. 1 Dynamic changes of soil water content at different stages of winter wheat

[注 (Note): BS—播种前 Before sowing; ES—起身期 Erecting stage; JS—拔节期 Jointing stage; AS—开花期 Anthesis stage; MS—成熟期 Maturity stage]

表 2 不同施氮量对冬小麦产量及产量构成因素的影响
Table 2 Effects of different N application rates on grain yield, component factors of yield of winter wheat

处理 Treat.	穗数 Spike ($\times 10^6/\text{hm}^2$)	穗粒数 Grains (No./spike)	千粒重 1000-grain wt. (g)	产量 Grain yield (kg/hm^2)
N_0	5.11 c	27.2 b	42.6 a	4981 d
N_{120}	6.33 b	28.6 a	40.0 a	6682 c
N_{180}	6.46 ab	28.8 a	40.0 a	7228 bc
N_{240}	7.14 a	28.7 a	41.9 a	8249 a
N_{300}	7.31 a	28.2 a	38.9 a	7345 ab

注 (Note): 同列数据后不同字母表示差异达 5% 显著差异水平
Values followed by different letters in a column are significant at 5% level.

从图 2 可以看出,当施氮量超过 N_{240} kg/hm^2 ,产量反而略有降低,呈现出氮肥的报酬递减规律。

2.2.2 对冬小麦吸氮量的影响 表 3 知, N_0 处理各器官吸氮量显著低于其它处理,说明施用氮肥可以提高小麦各器官吸氮量。植株总吸氮量以 N_{240} 处理最高,与其它处理间达到显著差异水平, N_{120} 、 N_{180} 、 N_{300} 处理间差异不显著。施氮量与小麦吸氮量呈抛物线关系:

$$y_{NA} = -0.0412x^2 + 21.395x + 4902.8, R^2 = 0.9155$$

当施氮量超过 N_{240} kg/hm^2 ,吸氮量随施氮量增加不再增长,而略有降低(图 2)。氮素收获指数随施氮量的增加而降低, N_{240} 和 N_{300} 两处理显著低于 N_0 和 N_{120} 处理,其它处理间差异不显著(表 3)。说明随施氮量增加,氮素的经济效益呈降低趋势。

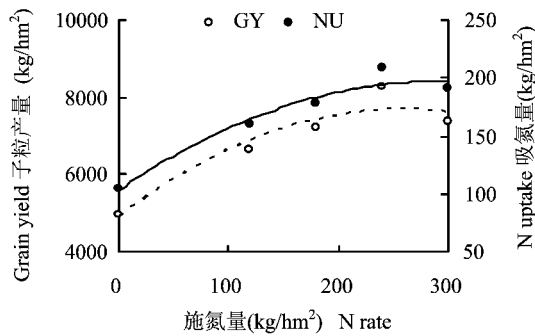


图2 施氮量与冬小麦产量、吸氮量的关系

Fig. 2 Relationships between grain yields, N uptake and the N rates

[注(Notes): GY—子粒产量 Grain yield; NU—吸氮量 N uptake]

2.3 不同施氮量对土壤硝态氮含量及分布的影响

图3表示不同施氮处理间100 cm 土层土壤硝态氮的时空动态变化。小麦播种至起身期,植株矮小,生长缓慢,吸氮量少;至起身期硝态氮在土壤中大量积累,随土层加深,含量降低。 N_0 处理0—20 cm 土层硝态氮含量显著低于其它处理;在20—100 cm 土层与 N_{120} 处理差异不显著,但显著低于其它3个处理。 N_{180} 处理在40—60、80—100 cm 土层与 N_{240} 、 N_{300} 处理差异显著, N_{240} 与 N_{300} 处理在各土层差异不显著。说明施氮显著增加表土层硝态氮含量,施 N 180 kg/hm² 以上时,20—100 cm 土层土壤硝态氮含量显著增加。

表3 不同施氮量对冬小麦不同器官吸氮量的影响

Table 3 Effects of the N application rates on N absorb of different organs of winter wheat

处理 Treatment	吸氮量 N uptake(kg/hm ²)					氮素收获指数 NHI
	叶片 Leaf	护颖+穗轴 Glume and ear axis	茎秆+叶鞘 Stalk and sheath	子粒 Seed	植株 Whole plant	
N_0	4.4 d	3.1 c	6.7 d	90.8 c	105.0 c	86.5 a
N_{120}	7.1 c	6.5 b	11.7 c	135.7 b	160.9 b	84.3 a
N_{180}	8.3 bc	7.4 ab	12.7 bc	149.4 ab	177.8 b	84.0 ab
N_{240}	12.0 a	8.8 a	17.4 a	170.0 a	208.3 a	81.7 b
N_{300}	10.0 ab	7.4 ab	16.2 ab	157.4 ab	191.0 b	83.0 b

注(Notes): 同列数据后不同字母表示差异达5%显著差异水平 Values followed by different letters in a column are significant at 5% level. NHI—N harvest index.

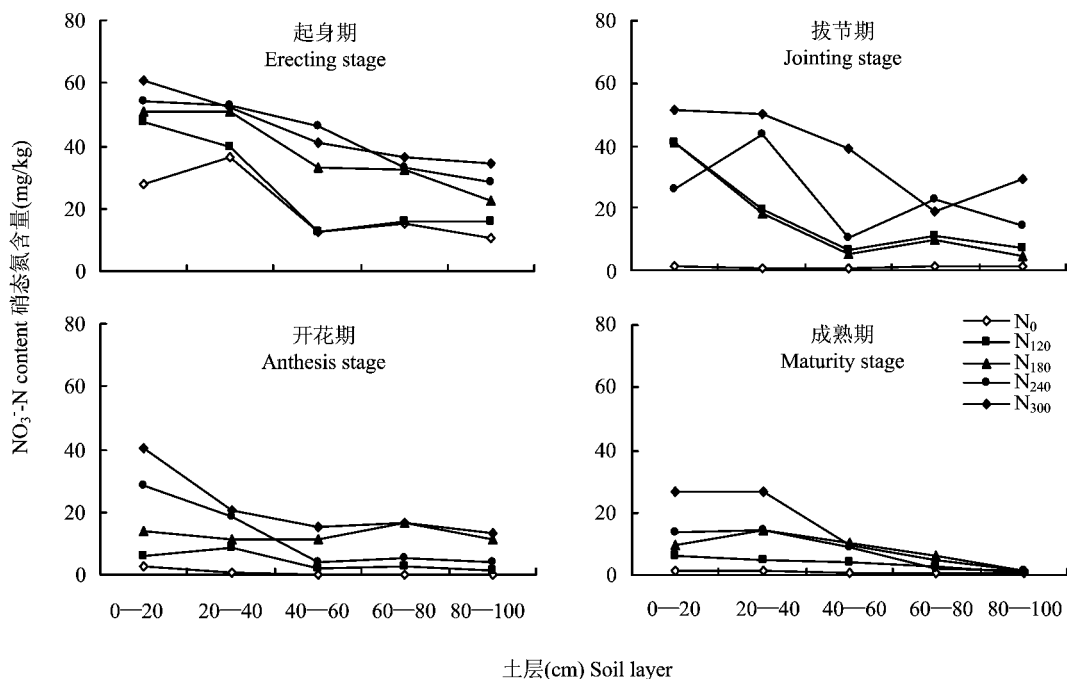


图3 不同施氮量对土壤硝态氮时空分布动态的影响

Fig. 3 Effects of the N application rates on dynamic changes of soil NO₃-N content at different soil layers and growth stages of wheat

起身至拔节期,随气温回暖,小麦生长加速,吸氮能力增强。 N_0 处理土壤硝态氮几乎耗尽,在各土层都明显低于其它处理。 N_{120} 与 N_{180} 处理在各土层差异不显著, N_{240} 、 N_{300} 处理在 60—100 cm 土层显著高于其它处理。

拔节至开花期是小麦生长旺盛期,吸氮强烈,在此期间虽结合灌水追施剩余 40% 氮肥,但至开花期土壤硝态氮含量仍低于拔节初期。 N_0 、 N_{120} 处理土壤氮素消耗殆尽,各土层硝态氮残留甚少,难以满足后期植株生长对氮素的需求。 N_{180} 处理在 0—40 cm 土层显著低于 N_{240} 处理; N_{300} 处理在 0—100 cm 各土层均高于其它处理。

成熟期 N_0 和 N_{120} 处理硝态氮各土层含量显著低于其它处理,0—100 cm 土层剖面残留量较少; N_{180} 与 N_{240} 处理在各土层差异不显著, N_{300} 处理 0—

40 cm 土层硝态氮含量显著高于其它处理。

2.4 不同施氮量对土壤氮素平衡及氮素利用的影响

2.4.1 对土壤氮素平衡的影响

铵态氮在土壤中残留较少,残留无机态氮以硝态氮为主。小麦生育期土壤有机氮矿化量为 40.1 kg/hm², (以未施氮小区计算,其它处理按与未施氮小区矿化量相同计算^[19])。表 4 看出,收获期 1m 土层土壤无机氮残留量及氮素表观损失量随施氮量增加呈增加趋势。土壤 N_{300} 处理无机氮残留量较 N_0 处理增加 3.4 倍,极易在夏季多雨季节随水分淋溶损失。氮素表观损失量 N_{180} 与 N_{240} 处理差异不显著,其它处理间均达到显著差异。氮素表观盈余 N_{180} 与 N_{240} 处理差异不显著,其它处理间均达到显著差异。在冬小麦生长季各处理氮素表观盈余以土壤氮素残留为主,表观损失量只占少部分。

表 4 不同施氮量对收获期 1m 土层土壤氮素平衡及氮素利用效率的影响

Table 4 Effects of different N application rates on Nmin balance in 1 meter soil layer at the harvest and N efficiencies of winter wheat

处理 Treat.	氮输入 N input (kg/hm ²)		氮输出 N output (kg/hm ²)							
	起始 N_{min} Initial N_{min}	施氮量 N rates	净矿化量 Net mineralization	植株 吸氮量 N uptake	残留 N_{min} N_{min} residue	氮表观 损失 N loss	氮表观 盈余 N surplus	NUE (%)	NAE (kg/kg)	NRE (%)
N_0	110	0	40.1	105.0 c	45.1 e	0 d	45.1 d			
N_{120}	110	120	40.1	160.9 b	70.8 d	38.4 c	109.2 c	52.4 a	16.8 a	21.4 c
N_{180}	110	180	40.1	177.8 b	102.9 c	49.4 b	152.3 b	44.2 b	14.5 b	32.1 bc
N_{240}	110	240	40.1	208.3 a	132.2 b	49.7 b	181.9 b	46.8 b	15.8 ab	36.3 b
N_{300}	110	300	40.1	191.0 a	197.2 a	61.9 a	259.1 a	23.4 c	9.0 c	50.7 a

注 (Note): N_{min} 无机氮积累量 ($NO_3^- - N + NH_4^+ - N$) Mineral N accumulation ($NO_3^- - N + NH_4^+ - N$); NUE—氮素表观利用率 N utilization efficiency; NAE—氮素农学利用率 N agronomy efficiency; NRE—氮素表观残留率 N residue efficiency. 同列数据后不同字母表示差异达 5% 显著差异水平 Values followed by different letters in a column are significant at 5% level.

2.4.2 对冬小麦氮素利用指标的影响

表 4 还看出,氮素表观利用率、农学利用率随施氮量增加呈降低趋势。 N_{180} 和 N_{240} 处理差异不显著,其它处理间均达到显著差异水平。氮素表观残留率随施氮量增加呈增加趋势, N_{300} 处理显著高于其它处理, N_{120} 与 N_{180} 处理差异不显著, N_{180} 与 N_{240} 差异不显著,其它处理间差异显著。

3 讨论

旱地土壤中无机态氮大多以硝态氮的形式存在。硝态氮以质流的方式在土壤中运移,或被植物根系吸收利用或随水分下渗淋洗。因而施肥和水分是影响氮素利用和损失的关键因子。周顺利等^[20]

认为,在生育期灌水 4 次条件下,土壤表层硝态氮向深层淋洗严重,且氮肥用量越高,土壤硝态氮含量越高,硝酸盐向深层淋洗也越严重。李世清等^[8]研究表明,土壤硝态氮淋洗与降雨量和灌溉量关系密切,随降雨或灌溉量增加而增加。

李世娟等^[21]研究结果看出,在节水灌溉下,冬小麦生长季土壤硝态氮 60% 在 0—20 cm 土层积累,不存在淋洗现象。本试验表明,在限水灌溉条件下,小麦起身后,土壤硝态氮在 0—100 cm 土层都有积累,且随土层加深含量降低,而同一土层含量随施氮量增加而增加;随着生育期的推进,土壤硝态氮积累量递减。小麦拔节后,植株吸氮量增加, N_0 处理拔节期后与 N_{120} 处理开花期后土壤硝态氮残留甚

少,表现出氮素亏缺,无法满足植株对氮素的需求。小麦生育期内没有强烈的降水及灌溉等淋洗条件,土壤硝态氮没有或很少移动到 1 m 土层以下,主要在 0—40 cm 土层积累。收获期土壤表观盈余以 1 m 土层土壤剖面氮残留为主,残留量随施氮量的增加而增加。 N_{300} 收获后土壤硝态氮的大量残留极易在随后多雨季节被进一步向深层或地下水淋洗。

巨晓棠等^[22]指出,在常规灌溉下,冬小麦氮素吸收随施氮量增加而显著增加,回收率随施氮量的增加而显著减少,损失量增加。李世娟等^[19]认为,节水灌溉条件下,降低施氮量可以提高氮肥当季利用率,减少氮肥损失。研究表明,在限水灌溉下,施氮量与冬小麦产量、吸氮量均呈抛物线关系,当施氮量超过 $N\ 240\ \text{kg}/\text{hm}^2$,产量和吸氮量随施氮量增加反而略有降低;氮素表观利用率、农学利用率随施氮量增加呈降低趋势,而氮素残留率随施氮量增加呈增加趋势。合理的施氮用量应该是在保证一定产量的基础上,提高氮肥当季利用率,降低氮素残留率。因此,在限水灌溉条件下,施氮量在 $N\ 180\sim 220\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时,是可以兼顾经济效益和环境效益的适宜施氮量。

黄淮海地区人多地少,水资源短缺等问题十分严峻,同时农业生产中存在灌水施肥过量等问题,不仅造成资源浪费,并带来环境污染。为维持该地区农业可持续发展,鼓励和发展冬小麦节水省肥栽培迫在眉睫。关于该地区冬小麦节水高产灌溉制度已有很多报道^[23-24],大量研究认为,节水可以省肥,通过水分和氮肥的最佳耦合,可以同步提高水肥利用效率^[15,23]。本研究认为,冬小麦生长前期,植株矮小,水肥需求小,拔节至开花期生长旺盛,水肥消耗量大,是水肥临界期和耦合关键期。农业生产中在浇足底墒及施底肥的基础上,水肥储量可以满足冬小麦拔节前期的需求,拔节前不必浇水或追肥。在拔节期结合灌水追施适量氮肥,把有限的资源优先用到关键期,提高资源利用效率,维持农业可持续发展。

参 考 文 献:

- [1] 史蒂文森,诺密克,拉德,等(闵九康,沈育芝,严慧俊,等译). 农业土壤中的氮[M]. 北京: 科学出版社,1989. 359-411.
Stevenson F J, Nommik, Ladd *et al* (Min J K, Shen Y Z, Yan H J *et al* translate). Nitrogen in agricultural soils[M]. Beijing: Science Press, 1989. 359-411.
- [2] Nikitishen V I, Lichko V I. Nitrogen budget in agro-ecosystems on gray forest soils under long-term fertilization[J]. *Eur. Soil Sci.*, 2008, 41(4): 429-440.
- [3] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(1): 1-6.
Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. *Soil Environ. Sci.*, 2009, 9(1): 1-6.
- [4] 巨晓棠,张福锁. 关于氮肥利用率的思考[J]. *生态环境*, 2003, 12(2): 192-197.
Jü X T, Zhang F S. Thinking about nitrogen recovery rate[J]. *Ecol. Environ.*, 2003, 12(2): 192-197.
- [5] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 778-782.
Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2008, 45(5): 778-782.
- [6] 张维理,田哲旭,张宁,等. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. *植物营养与肥料学报*, 1995, 1(2): 80-87.
Zhang W L, Tian Z X, Zhang N *et al*. Investigation of nitrate pollution in ground water due to nitrogen fertilization in agriculture in north China[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 1995, 1(2): 80-87.
- [7] 吕殿青,同延安,孙本华. 氮肥施用对环境污染影响的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(1): 8-15.
Lü D Q, Tong Y A, Sun B H. Study on effect of nitrogen fertilizer use on environment pollution[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 1998, 4(1): 8-15.
- [8] 李世清,李生秀. 半干旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(2): 240-242.
Li S Q, Li S X. Leaching loss of nitrate from semiarid area agro-ecosystem[J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2000, 11(2): 240-242.
- [9] 张福锁,巨晓棠. 对我国持续农业发展中氮肥管理与环境问题的几点认识[J]. *土壤学报*, 2002, 39(增刊): 42-54.
Zhang F S, Ju X T. Discussion on nitrogen management and environment in agro-ecosystems of sustained development of agriculture[J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2002, 39(Sup.): 42-54.
- [10] 刘敏超,曾长立,王兴仁. 氮肥施用对冬小麦氮肥利用率及土壤剖面硝态氮含量动态分布的影响[J]. *农业现代化研究*, 2000, 21(5): 309-312.
Liu M C, Zeng C L, Wang X R. Effects of nitrogen fertilizer in winter wheat on its utilization rate and dynamic distribution of $\text{NO}_3\text{-N}$ in Soil Layers[J]. *Res. Agric. Moder.*, 2000, 11(5): 309-312.
- [11] 袁新民,杨学云,同延安. 不同施氮量对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2001, 19(1): 8-13.
Yuan X M, Yang X Y, Tong Y A. Effect of N-fertilizer rate on soil nitrate nitrogen accumulation[J]. *Agric. Res. Arid Areas*, 2001, 19(1): 8-13.
- [12] 王小彬,蔡典雄,张志田,等. 稳态水流下肥料氮的运移[J]. *植物营养与肥料学报*, 1996, 2(2): 110-115.
Wang X B, Cai D X, Zhang Z T *et al*. Study on fertilizer N transfer under steady state flow[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 1996, 2(2): 110-115.
- [13] 武晓峰,谢森传. 冬小麦田间根层中氮素迁移转化规律研究

- [J]. 灌溉排水, 1996, 15(4): 10-15.
- Wu X F, Xie S C. A study on transformation and transportation of nitrogen in the root zone of winter wheat in fields[J]. J. Irrig. Drain., 1996, 15(4): 10-15.
- [14] 李生秀, 李世清, 高亚军, 等. 施用氮肥对提高旱地作物利用土壤水分的作用机理和效果[J]. 干旱地区农业研究, 1994, 12(1): 38-46.
- Li S X, Li S Q, Gao Y J *et al.* The mechanism and effects of N fertilization in increasing water use efficiency[J]. Agric. Res. Arid Areas, 1994, 12(1): 38-46.
- [15] 翟丙年, 李生秀. 冬小麦水氮配合关键期和亏缺敏感期的确定[J]. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1188-1195.
- Zhai B N, Li S X. Study on the key and sensitive stage of winter wheat responses to water and nitrogen coordination[J]. Sci. Agric. Sin., 2005, 38(6): 1188-1195.
- [16] 李志勇, 陈建军, 王璞. 不同水氮优化组合模式对冬小麦产量形成及水氮资源利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2005, 20(2): 66-71.
- Li Z Y, Chen J J, Wang P. Effects of the different irrigation-fertilization optimization models on grain yield, yield structure and water and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. Acta Agric. Bor.-Sin., 2005, 20(2): 66-71.
- [17] Sharma B D, Kar S, Cheema S S. Yield water use and nitrogen uptake for different water and N levels in winter wheat[J]. Fert. Res., 1990, 22: 119-127.
- [18] 石维, 同延安, 赵营, 等. 灌溉施肥对冬小麦土壤氮素盈亏的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(2): 93-97.
- Shi W, Tong Y A, Zhao Y *et al.* Effect of N fertilizer and irrigation on apparent budget of soil N in winter wheat in anthrosol[J]. J. Tritic Crops, 2006, 26(2): 93-97.
- [19] 刘学军, 赵紫娟, 巨晓棠, 等. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1122-1128.
- Liu X J, Zhao Z J, Ju X T *et al.* Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer N recovery and balance[J]. Acta Ecol. Sin. 2002, 22(7): 1122-1128.
- [20] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏研究 I. 冬小麦[J]. 生态学报, 2001, 21(1): 1782-1789.
- Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. Studies on the spatio-temporal variations of soil NO₃⁻-N and apparent budget of soil nitrogen I. winter wheat[J]. Acta Ecol. Sin., 2001, 21(11): 1782-1789.
- [21] 李世娟, 诸叶平, 孙开梦, 等. 冬小麦节水灌溉制度下不同施氮量的氮素平衡[J]. 核农学报, 2003, 17(6): 472-475.
- Li S J, Zhu Y P, Sun K M *et al.* N balance of different N application rate of winter wheat under water-saving condition[J]. Acta Agric. Nucl. Sin., 2003, 17(6): 472-475.
- [22] 巨晓棠, 潘家荣, 刘学军, 等. 高肥力土壤冬小麦生长季肥料氮的去向研究 I. 冬小麦生长季肥料氮的去向[J]. 核农学报, 2002, 16(6): 397-402.
- Ju X T, Pan J R, Liu X J *et al.* The fate of nitrogen fertilizer in winter wheat growth season under high soil fertility condition[J]. Acta Agric. Nucl. Sin., 2002, 16(6): 397-402.
- [23] 王志敏, 王璞, 兰林旺, 等. 黄淮海地区优质小麦节水高产栽培研究[J]. 农艺科学, 2003, 19(4): 22-25.
- Wang Z M, Wang P, Lan L W *et al.* A Water-saving and high-yielding cultivation system for bread wheat in Huang-Huai-Hai area of China[J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2003, 19(4): 22-25.
- [24] 马瑞昆, 贾秀领. 冬小麦节水高产的生理基础和调控技术[J]. 河北农业科学, 2000, 4(2): 49-75.
- Ma Y K, Jia X L. Physiological basis and regulation techniques for water-saving and high yield in winter wheat[J]. J. Hebei Agric. Sci., 2000, 4(2): 49-75.